

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS
ARREFECIDOS ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES ESTENDIDAS VIA CFD

por

Rafael Vinícius de Freitas Elesbão

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS
ARREFECIDOS ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES ESTENDIDAS VIA CFD

por

Rafael Vinícius de Freitas Elesbão

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis H. R. França

M. Eng. Tiago H. Andriotty

Profa. Dra. Thamy C. Hayashi

Porto Alegre, 08 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha orientadora, Professora Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, pela disponibilidade, apoio e atenção desde o primeiro contato, assim como foi durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço à minha mãe, Eleni e ao meu irmão, Lucas, por me ouvirem e dialogarem sempre que algo não acontecia da forma esperada, seja ao longo deste trabalho ou ao longo da vida.

Agradeço à minha namorada, Jéssica, pelo amor e companheirismo não somente ao longo da elaboração deste trabalho, mas também ao longo destes últimos anos, onde seu suporte e atenção foram fundamentais.

Aos meus amigos, obrigado pelo apoio e pela companhia durante essa jornada.

ELESBÃO, R.V.F. **“ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS ARREFECIDOS ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES ESTENDIDAS VIA CFD”**. 2017. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo a avaliação do comportamento da eficiência de painéis Solares fotovoltaicos através da utilização de superfícies estendidas instaladas na face posterior dos mesmos, a fim de reduzir a temperatura de operação do módulo. Essa redução tem uma relação direta com o aumento da potência elétrica gerada pelo mesmo. Ao longo do trabalho são propostos diversos arranjos, variando tanto o número de aletas como os seus respectivos comprimentos, visando encontrar a combinação que oferece a maior eficiência de conversão de energia. Para o caso onde se obtém o maior aumento na eficiência do módulo, a potência elétrica gerada pelo mesmo é de 9,43% superior em relação ao painel sem aletas. Entretanto, para quantidades maiores de material empregado nas aletas, o retorno, em termos de eficiência, acaba sendo cada vez menor, o que passa a ser cada vez menos interessante do ponto de vista de eficiência, de projeto, e de custo final como produto.

PALAVRAS-CHAVE: Módulo fotovoltaico, superfícies estendidas, modelo numérico, transferência de calor

ELESBÃO, R.V.F. **“CFD ANALYSIS OF THE EFFICIENCY IMPROVEMENT IN SOLAR PANELS COOLED BY EMPLOYING EXTENDED SURFACES”**. 2017. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The main goal of this paper is to evaluate the improvement in the efficiency of Solar photovoltaic panels by equipping heat sinks on the panel's posterior face, in order to lower the panel's operational temperature. As the temperature of the panel is reduced, the power output increases proportionally. Throughout this paper, several arrays are presented where the height and the amount of fins vary in each model, in order to find the combination that offers the best energy efficiency conversion. For the case where the highest panel efficiency was achieved, the power output was increased by about 9,43%. However, as the amount of materials used in the fins increases, there are diminishing returns in terms of energy conversion efficiency, which in turn ends up becoming less appealing in regards of project efficiency and the product's final price.

KEYWORDS: Solar panel, extended surfaces, numerical model, heat transfer

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	1
3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	2
3.1 O Efeito Fotovoltaico	2
3.2 Módulos Fotovoltaicos	2
3.3 Eficiência do Módulo Fotovoltaico.....	2
4. ESTUDO DE CASO.....	4
5. ABORDAGEM NUMÉRICA.....	7
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
7. CONCLUSÕES.....	13
7.1 Discussão.....	13
7.2 Trabalhos Futuros.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A ideia de buscar fontes renováveis de energia não é recente. Porém, apenas nas últimas décadas houveram interesse e incentivos maiores na área de pesquisa e desenvolvimento de formas de otimizar a obtenção de energia que ofereça pouco ou o mínimo de impacto ao meio ambiente. Existem programas de grandes agências internacionais, como as Nações Unidas para incentivar a aplicação destas novas tecnologias (Twidell *et al.*, 2006). A energia proveniente do Sol pode ser convertida diretamente a partir da irradiação incidente sobre a Terra, assim como através de outras formas de energia renovável que existem como consequência da irradiação Solar, como, por exemplo, a eólica, a hidrelétrica e a biomassa (Sorensen, 2011).

A irradiação Solar incidente sobre a Terra varia conforme a latitude, condições climáticas e época do ano. Sendo assim, a orientação (azimute) e a inclinação do módulo fotovoltaico são essenciais para otimizar a geração de energia elétrica. Outro fator importante é a redução do custo de instalação, por watt-pico, que caiu de US\$ 30/Wp para US\$ 4/Wp, entre 1975 e 1995 (Vanek *et al.*, 2012). Logo acima da atmosfera terrestre, o fluxo de energia (irradiância) oriundo do Sol que chega à Terra é de cerca de 1367 W/m², valor conhecido como constante Solar (Twidell *et al.*, 2006). Devido à absorção, à refração e ao espalhamento na atmosfera, fatores climáticos e localização no globo terrestre, uma determinada instalação receberá sempre uma irradiância inferior ao valor dessa constante (Vanek *et al.*, 2012).

De acordo com Popovici *et al.*, 2015, é possível reduzir a temperatura de operação do módulo com o emprego de superfícies estendidas na face posterior do mesmo. Também segundo os autores, a eficiência das aletas depende da sua forma e orientação. Ou seja, aletas posicionadas perpendicularmente ao escoamento proporcionam diferentes resultados em termos de temperatura de operação do módulo, conforme o ângulo de inclinação das aletas, assim como o espaçamento entre as mesmas.

Borkar *et al.*, 2014, comprova através de simulação numérica e experimentação que a redução da temperatura de operação do módulo fotovoltaico não apenas leva a um aumento na potência gerada pelo mesmo, mas também aumenta o seu tempo de vida útil. Isso porque, operando em alta temperatura, o dispositivo sofre uma degradação acelerada. O autor analisa, também, o comportamento da temperatura do módulo para diversas temperaturas do ar atmosférico, comprovando que a eficiência de conversão de energia do módulo sofre grande redução, caso a temperatura do ar externo seja muito elevada.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a temperatura de operação, bem como a eficiência na geração, através de simulação, de um módulo fotovoltaico com superfícies estendidas na sua parte posterior. São testados diferentes arranjos de superfícies estendidas. Assume-se que o mesmo encontra-se instalado em um prédio de fachada dupla, no qual o ar circula no espaço entre as fachadas, visando reduzir a temperatura de operação do módulo, instalado na fachada externa. As simulações são realizadas com o auxílio do *Software* Ansys.

3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Neste capítulo serão apresentados os aspectos gerais de um módulo fotovoltaico e a influência da temperatura em sua operação.

3.1 O Efeito Fotovoltaico

Segundo Vanek *et al.*, 2012, o efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Henri Becquerel. Este fenômeno permite que os fótons, oriundos do Sol, após entrar em contato com determinados materiais, induzam uma corrente elétrica. De acordo com Twidell *et al.*, 2006, as junções dos semicondutores, ou células fotovoltaicas, geram em torno de 0,5 V com densidades de corrente de 400 A/m² para condições de céu limpo, com irradiância 1000 W/m², e temperatura de operação de 25°C. Ainda segundo o autor, para condições de “Sol abundante”, com cerca de 20 MJ/m² por dia, o uso de módulos fotovoltaicos pode ser, inclusive, mais barato que meios convencionais de geração de energia, como os geradores a diesel, principalmente, se forem consideradas áreas remotas, onde manutenção e acesso são fatores de alto custo.

3.2 Módulos Fotovoltaicos

Cada célula fotovoltaica, através do efeito fotovoltaico, transforma a energia dos fótons incidentes em corrente elétrica (contínua) que alimenta o sistema (Vanek *et al.*, 2012). O módulo é um arranjo de diversas células fotovoltaicas (para fins comerciais, 36, 60 ou 72). Cada módulo, por sua vez, é capaz de gerar entre 140 Wp (36 células) e 325 Wp (72 células). Sendo assim, é necessário um arranjo (painel) de diversos módulos para tornar seu emprego viável, seja em residências, ou em instalações comerciais (Vanek *et al.*, 2012). Existe uma busca constante por novos materiais que proporcionem um aumento da eficiência e redução do custo de instalação do sistema. Segundo Popovici *et al.*, 2015, é possível também aumentar a eficiência do sistema através da redução da temperatura de operação do módulo. Segundo Twidell *et al.*, 2006, nos últimos anos, a geração de energia através de painéis fotovoltaicos cresceu de 50 MWp em 1990 para 500 MWp em 2013.

3.3 Eficiência do Módulo Fotovoltaico

Diversos fatores influenciam a eficiência de conversão de energia de um módulo fotovoltaico. Vanek *et al.*, 2012 cita a temperatura de operação como o fator crucial na determinação da eficiência de um módulo fotovoltaico. À medida que a temperatura aumenta, a corrente elétrica aumenta linearmente, enquanto a tensão diminui exponencialmente, Figura 3.1.

Com o passar do tempo, o módulo sofre deterioração e sua eficiência diminui. Assim, o autor sugere que as alternativas para aumentar a eficiência do módulo são as seguintes: concentrar a radiação sobre as células, para aumentar a quantidade de fótons que incidem sobre a mesma, ou reduzir a temperatura do módulo.

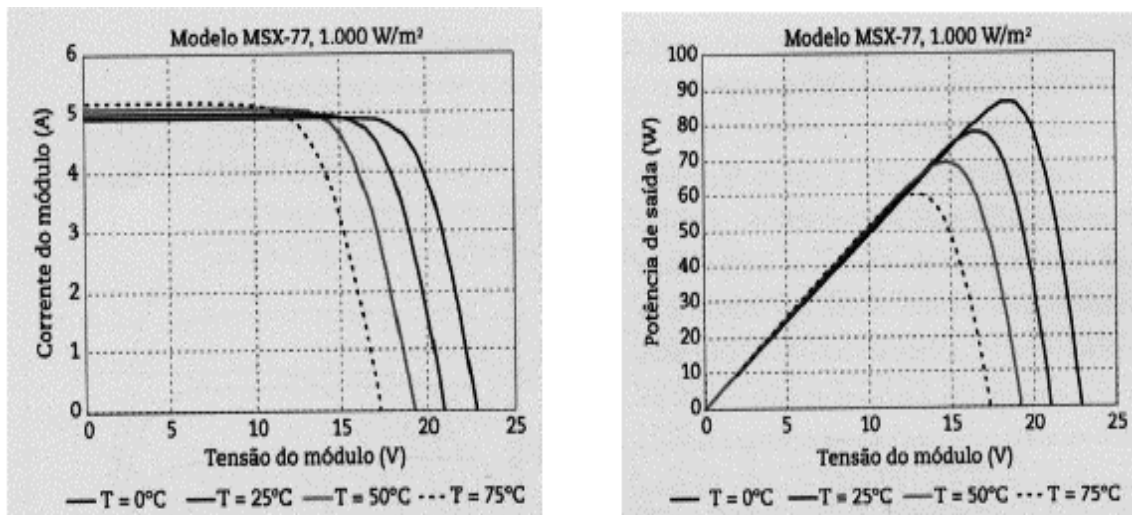


Figura 3.1 – Variação da corrente (à esquerda) e da tensão (à direita) em função da temperatura da célula para o mesmo valor de irradiância incidente no plano normal ao módulo (Zilles *et al.*, 2012).

O presente trabalho tem como foco o estudo da segunda opção. De acordo com Sorensen, 2011, as células utilizadas atualmente apresentam uma variação (decréscimo) de eficiência de 0,4% a 0,5% para cada $^\circ\text{C}$. Consequentemente, a potência máxima do módulo também reduz com o aumento da temperatura de operação, conforme a Figura 3.2.

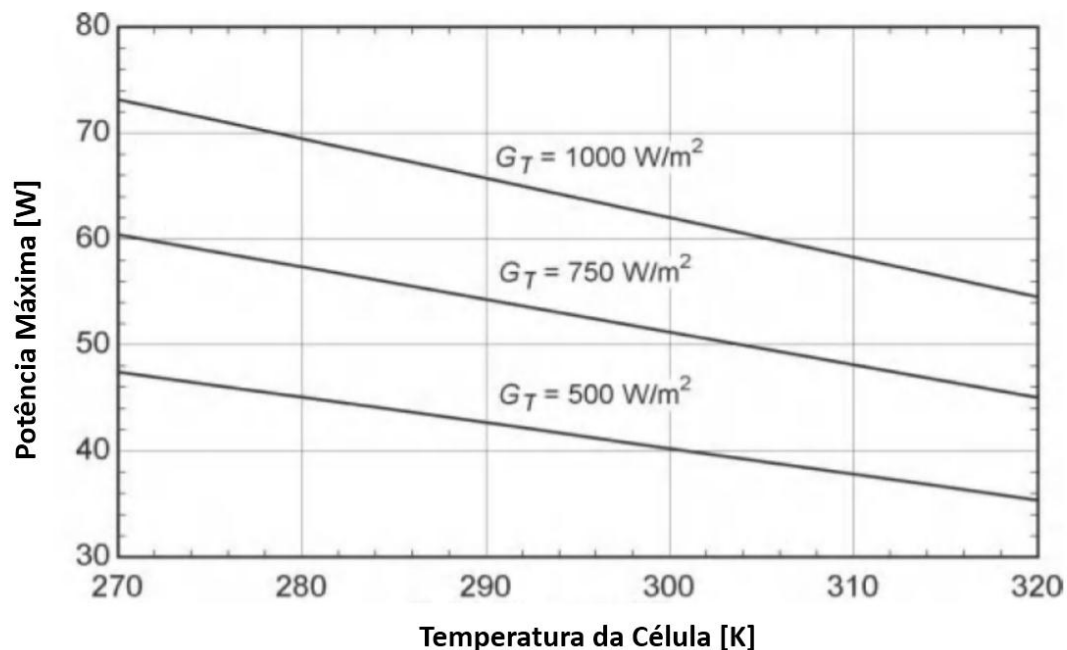


Figura 3.2 – Variação da potência máxima em função da temperatura da célula para diferentes valores de irradiância incidente no plano normal ao módulo. (Duffie e Beckman, 2013).

4. ESTUDO DE CASO

Ao longo deste trabalho, foram propostos diferentes arranjos de superfícies estendidas a serem instaladas na face posterior de um módulo fotovoltaico de 500 mm x 250 mm, com a finalidade de aumentar a taxa de transferência de calor e, consequentemente, reduzir a temperatura de operação do mesmo. O módulo em questão encontra-se instalado na parede externa de um prédio, de fachada dupla. Segundo Boake *et al.*, 2003, esta configuração de fachada, em edifícios, é comum em construções mais sofisticadas, cujo o objetivo é a redução ruído externo e da irradiação solar incidente. No vão entre as duas paredes, a circulação do ar é forçada, entrando na base do prédio e saindo na parte superior, proporcionando a recirculação do ar ao longo de todos os andares do edifício. Para as simulações, a extensão do vão entre as fachadas é de 100 mm.

Com o propósito de aumentar a transferência de calor e reduzir a temperatura de operação do módulo em questão, são propostos nove arranjos diferentes para superfícies estendidas acopladas à sua parte posterior, e um arranjo adicional sem as referidas superfícies, para fins de comparação. As aletas estão voltadas para o canal entre as duas paredes, sendo submetidas a um escoamento oriundo do sistema de ventilação e do sistema de ar condicionado. De acordo com Armstrong *et al.*, 2010, para obter resultados satisfatórios, é necessário conhecer a estrutura do material que compõem o módulo.

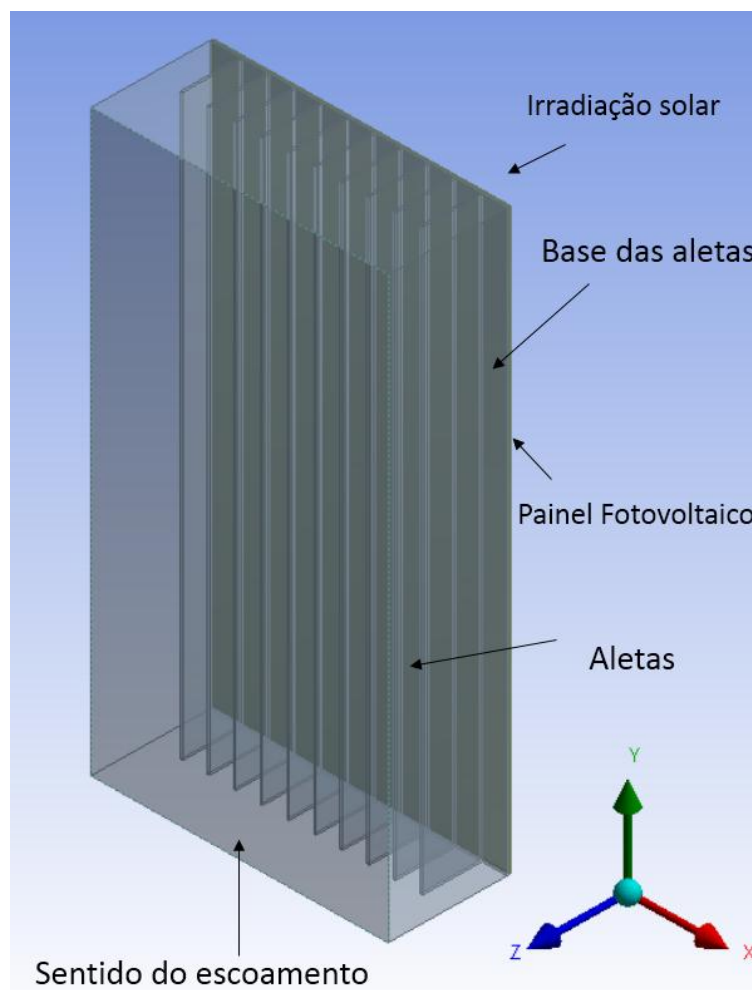


Figura 4.1 – Elementos básicos do sistema composto pelo módulo e o arranjo de aletas.

Os principais componentes dos módulos comercializados, atualmente, são os seguintes: vidro, cobertura antirreflexiva, células fotovoltaicas, etil vinil acetato (EVA), e fluoreto de polivinila (PVF). Assim, como proposto por Popovici *et al.*, 2015, o módulo será simplificado, tendo apenas uma camada, composta pelo material das células fotovoltaicas. Essa hipótese simplifica a simulação computacional. O módulo tem espessura de 1 mm e assim como proposto por Popovici *et al.*, 2015, possui condutividade térmica de 148 W/mK, massa específica de 2330 kg/m³ e calor específico de 677 J/kgK. A Figura 4.1 apresenta os componentes básicos da simulação, para o caso com dez aletas, cada uma com 50 mm de altura.

A Figura 4.2 apresenta as dimensões dos componentes do sistema módulo e arranjo de aletas. As dimensões são as seguintes: espaço do vão entre as paredes, H , espessura da aleta e da base das aletas, e , espessura do módulo fotovoltaico, p , altura das aletas, h , e número total de aletas, N .

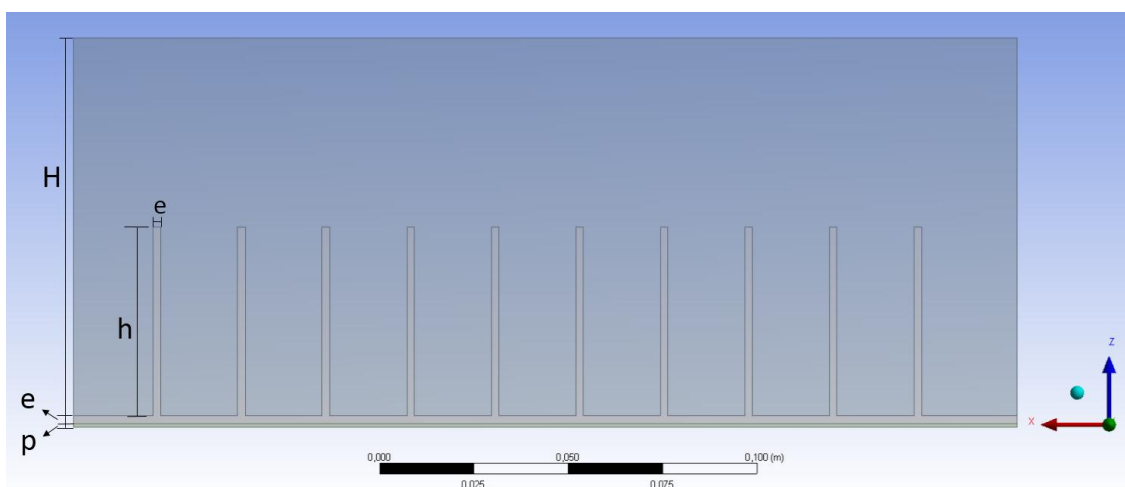


Figura 4.2 – Dimensões dos componentes do sistema.

Os valores desses parâmetros, para cada caso, são apresentados na Tabela 4.1. Conforme pode ser observado, o vão, H , a espessura da aleta e da base, e , e a espessura do módulo, p , foram mantidos constantes para todos os casos.

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros utilizados nos casos analisados.

	H [mm]	e [mm]	p [mm]	h [mm]	N
Caso 1	100	2	1	--	--
Caso 2	100	2	1	30	4
Caso 3	100	2	1	50	4
Caso 4	100	2	1	70	4
Caso 5	100	2	1	30	10
Caso 6	100	2	1	50	10
Caso 7	100	2	1	70	10
Caso 8	100	2	1	30	16
Caso 9	100	2	1	50	16
Caso 10	100	2	1	70	16

Para todas as simulações realizadas, a irradiância incidente no módulo, ϕ , é igual a 400 W/m². A face voltada para o canal, entre as paredes, está submetida a um escoamento com velocidade de 1,5 m/s. Segundo Boake *et al.*, 2003, no vão entre as paredes, pode haver não somente o escoamento oriundo da convecção natural, devido ao aquecimento da face externa, mas também o ar proveniente do sistema de recirculação de ar entre os andares do edifício. A temperatura do ar na entrada do módulo é de 308 K para todos os casos. Todas as aletas são consideradas chapas de alumínio de 2 mm de espessura, com massa específica 2719 kg/m³, calor específico 871 J/kgK, e condutividade térmica de 202,4 W/m K. As propriedades do ar são consideradas para o ar padrão a 1 atm. A Figura 4.3 apresenta a variação da densidade do ar após uma das simulações realizadas (caso 9).

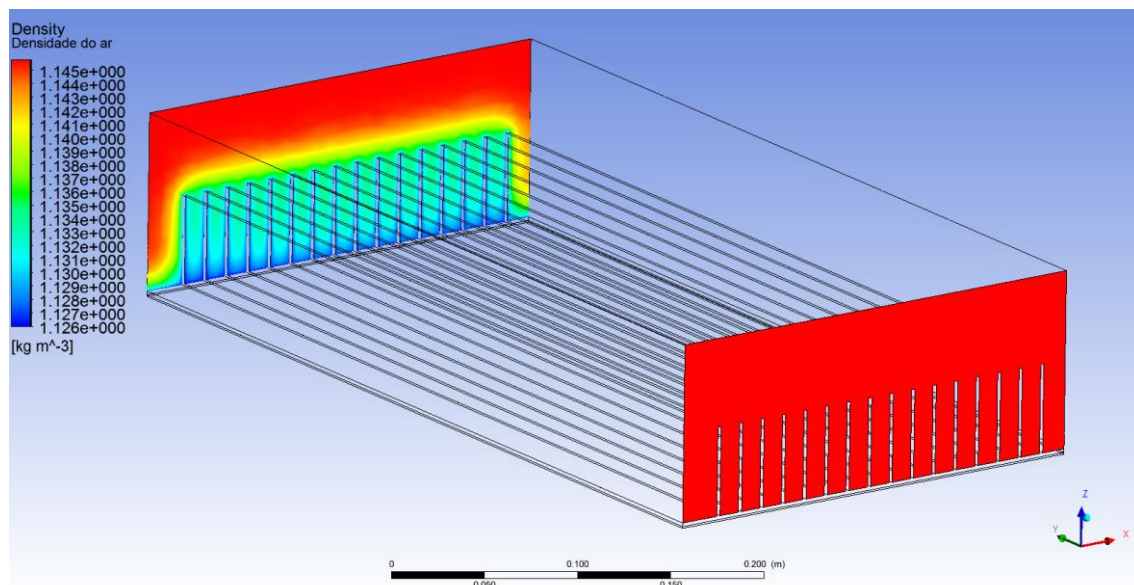


Figura 4.3 – Distribuição da massa específica do ar na entrada e saída do volume de controle para o caso 9.

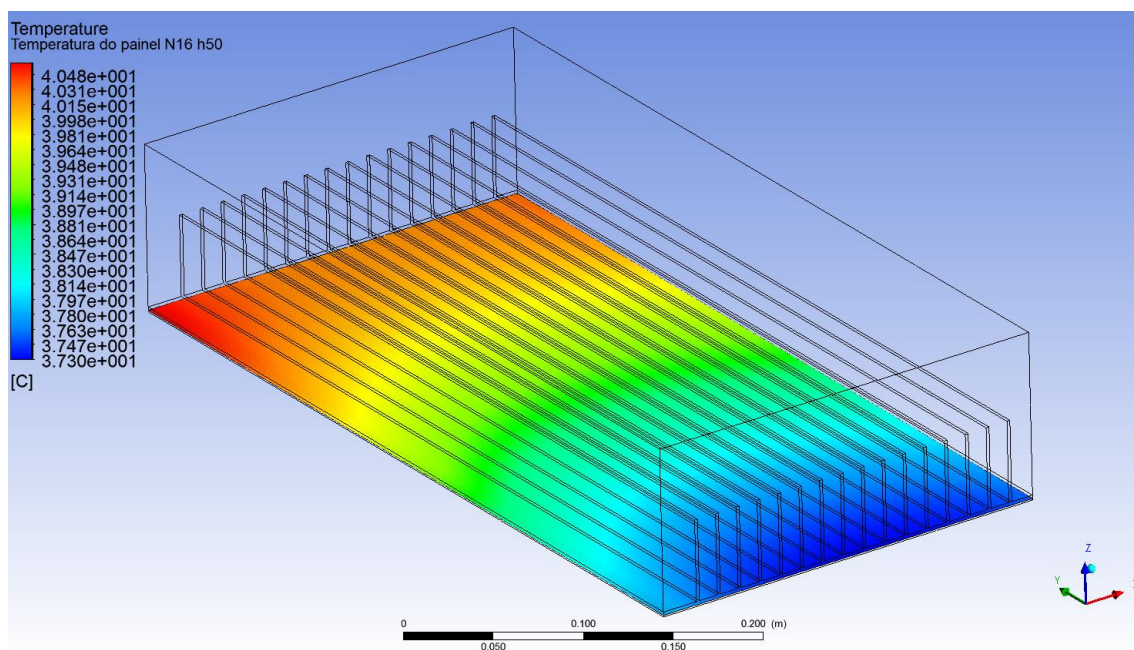


Figura 4.4 – Distribuição de temperaturas no módulo para o caso 9.

Para todos os casos estudados, o valor de temperatura do módulo é considerado como sendo a igual à temperatura média do módulo. A distribuição de temperaturas no módulo, para o caso 9 pode ser vista na Figura 4.4.

5. ABORDAGEM NUMÉRICA

Em um primeiro momento, cada arranjo foi modelado no *Software SolidWorks*. Em seguida, cada um dos casos foi importado para o *Software Ansys Fluent*, onde aos dez casos estudados foram atribuídas malhas para uma simulação preliminar. Os valores atribuídos para as variáveis - *número de aletas (N)* e *altura das aletas (h)* - para cada um dos casos, encontram-se na Tabela 4.1.

Inicialmente malhas com aproximadamente 400.000 volumes de controle foram atribuídas aos modelos a fim de quantificar um valor de temperatura preliminar do módulo para cada arranjo. De acordo com Maliska, 2013, é necessário tratar com cuidado a forma e disposição dos volumes de controle nas fronteiras do modelo, pois ali as condições de contorno serão aplicadas, e a coincidência da malha com a fronteira, influenciará diretamente na qualidade do resultado obtido.

As simulações foram realizadas com auxílio do Fluent, que faz parte do *Software Ansys*. Como o número de Reynolds é de aproximadamente 46.875, quando o módulo é modelado como placa plana, o escoamento de 1,5 m/s no sentido positivo do eixo *y* é tratado como turbulento ao longo do volume de controle. O modelo de turbulência utilizado é o *kappa-epsilon (k-ε)* com o método de “grupo de renormalização”, RNG, da sigla em inglês. Segundo a documentação do manual do Ansys, este método é recomendado para escoamentos turbulentos no interior de canais fechados. Para utilizar este modelo de turbulência, é necessário fornecer ao *software* o valor da intensidade de turbulência, que é função do número de Reynolds, e vale 4,17% e o diâmetro hidráulico, que para todas as simulações é igual a 571 mm. Estes valores podem ser obtidos através das Equações 5.1 e 5.2, respectivamente.

$$I = 0,16Re^{-0,125} \quad (5.1)$$

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (5.2)$$

Todas as simulações foram feitas com a opção de precisão dupla através do modo SIMPLE. Segundo Maliska, 2013, uma das vantagens do método dá-se ao fato de não ser necessário resolver o sistema de equações para a pressão, pois a mesma utiliza uma relação entre o campo de velocidade e o campo de pressão para obter o campo de pressão de forma iterativa. Para a conservação da quantidade de movimento, foi utilizado um esquema *upwind* de segunda ordem. Como critério de convergência, foi adotado 10^{-6} para os termos referentes à continuidade, energia e velocidade, assim como para os termos *k* e *ε* do modelo de turbulência.

As malhas empregadas nos cálculos preliminares receberam maior atenção no contato entre o fluido e a base das aletas, e um foco menor no contato entre fluido e as aletas ao longo de seu comprimento. Em um momento posterior, para o Caso 6 (*N* = 10, *h* = 50 mm), foi feita uma análise da malha empregada, onde foram testados diversos níveis de discretização para a malha utilizada. Tal procedimento teve como objetivo encontrar um valor ou uma faixa de valores para os volumes de controle a partir da qual um aumento do número de elementos na malha ocasionasse um alteração sucessivamente menor no valor da temperatura de operação do módulo. A análise do

erro relativo para a temperatura entre as sucessivas simulações foi o critério escolhido para definir o ponto onde a discretização está suficientemente satisfatória. Após encontrado o valor adequado para o número de volumes de controle, todas as simulações foram realizadas novamente para este nível de discretização.

Segundo Maliska, 2013, as propriedades da malha são definidas pelo número, forma e tamanho dos elementos. Outro ponto que o autor salienta, está no fato da necessidade dos triângulos aproximarem-se ao máximo de triângulos equiláteros, para que as funções de interpolação sejam bem representadas. Tanto para o processo de otimização da malha, assim como para as simulações com as malhas refinadas, foi dada atenção especial para as interfaces entre os materiais, já que as geometrias dos modelos variavam de caso a caso. Para o Caso 6 com 900.000 volumes de controle, o tamanho de face máximo e mínimo é de 0,0056 m e 0,000283 m, respectivamente. Uma vista em corte do Caso 6, com aproximadamente 900.000 volumes, onde os volumes estão evidenciados, pode ser visto na Figura 5.1.

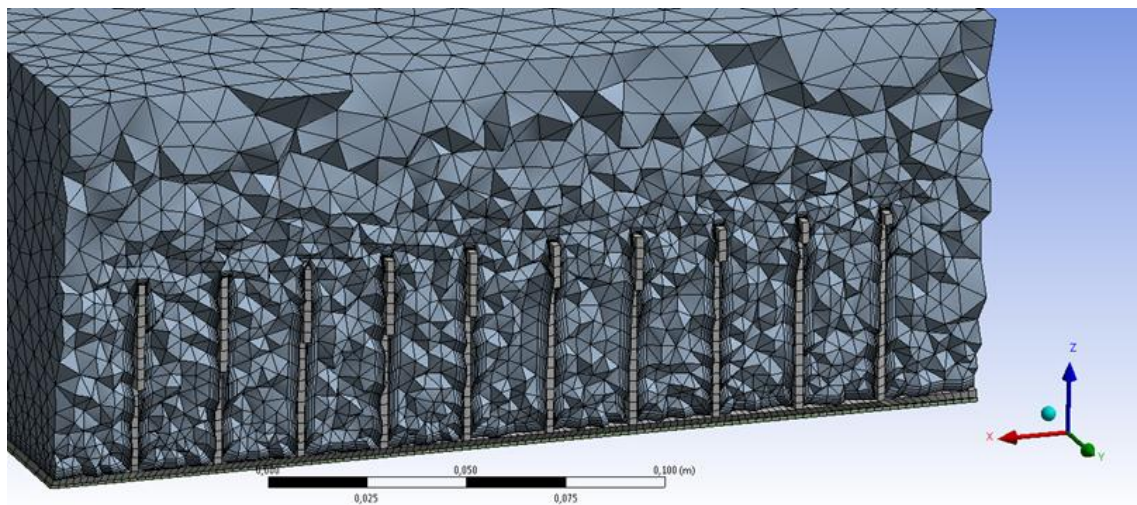


Figura 5.1 – Vista em corte do Caso 6 ($N = 10$, $h = 50$ mm) com a malha de aproximadamente 900.000 volumes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como referencial para os cálculos que envolvem potência e eficiência do módulo, o modelo comercial JKM310P-72 do fabricante Jinko Solar foi o escolhido. De acordo com o fabricante, a eficiência de conversão de energia é de 15,98%, e essa eficiência reduz em 0,41% para cada °C acima da temperatura padrão de operação de 25 °C. Segundo Duffie e Beckman, 2013, para a condição de 1000 W/m² à 25°C, o módulo Solar gera a maior potência possível, valor dado em W_p (watt-pico). Porém, em situações reais, a potência dependerá da temperatura e da intensidade da irradiância incidente. Este módulo pode gerar até 310 W_p . Com o incremento do número de aletas e de seu comprimento, ocorre redução significativa da temperatura do módulo, T_p , e por consequência um aumento da potência elétrica, P_{el} , gerada pelo módulo. A potência específica do módulo é dada por

$$P_{esp} = \eta \Phi \quad (6.1)$$

na qual P_{esp} é a potência específica do módulo, η é a eficiência do módulo e Φ é o fluxo de irradiação (irradiância) incidente sobre o módulo, assumido como 400 W/m^2 .

A Tabela 6.1 apresenta os valores da temperatura média do módulo, T_p , *fração da potência nominal*, PN , eficiência do módulo, η_{mod} , *potência elétrica específica*, P_{esp} , potência elétrica, P_{el} , para cada caso, assim como o aumento da potência elétrica em relação ao caso base, AP_{el} para todos os casos com aproximadamente 400.000 volumes de controle.

Com a finalidade de melhorar a qualidade das simulações, foi feito o processo de otimização da malha, onde as regiões de fronteira dos volumes de controle receberam uma discretização mais sofisticada, tanto em número de volumes na fronteira, como na orientação dos elementos da malha. O parâmetro escolhido ao longo desse procedimento foi a variação da temperatura do módulo, em função do número de volumes de controle. Nesta análise, foi levado em conta o erro relativo entre os sucessivos incrementos no número de volumes de controle para o Caso 6. Este caso foi escolhido simplesmente por ser o intermediário tanto para a quantidade de aletas, como para o comprimento das mesmas. A variação da *temperatura média do módulo*, T_p em função do número de volumes de controle é apresentada na Figura 6.1.

Tabela 6.1. Valores das temperaturas e eficiências do módulo para as simulações com aproximadamente 400.000 volumes para cada caso

Caso	T_p [°C]	PN [%]	η_{mod}	P_{esp} [W/m²]	P_{el} [W]	AP_{el} [%]
1	57,78	86,6	0,138	55,33	6,92	-
2	48,51	90,4	0,144	57,76	7,22	4,38
3	45,87	91,4	0,146	58,45	7,31	5,64
4	43,26	92,5	0,148	59,14	7,39	6,88
5	43,10	92,6	0,148	59,18	7,40	6,95
6	40,21	93,8	0,150	59,93	7,49	8,32
7	39,35	94,1	0,150	60,16	7,52	8,73
8	42,02	93,0	0,149	59,46	7,43	7,47
9	38,96	94,3	0,151	60,26	7,53	8,91
10	37,86	94,7	0,151	60,55	7,57	9,41
STC*	25	100	0,160	63,92	7,99	-

* Condição Padrão de Operação: 1,5 AM, 1000 W/m^2 , 25°C .

Refino de malha para o Caso 6 ($N = 10$, $h = 50$)

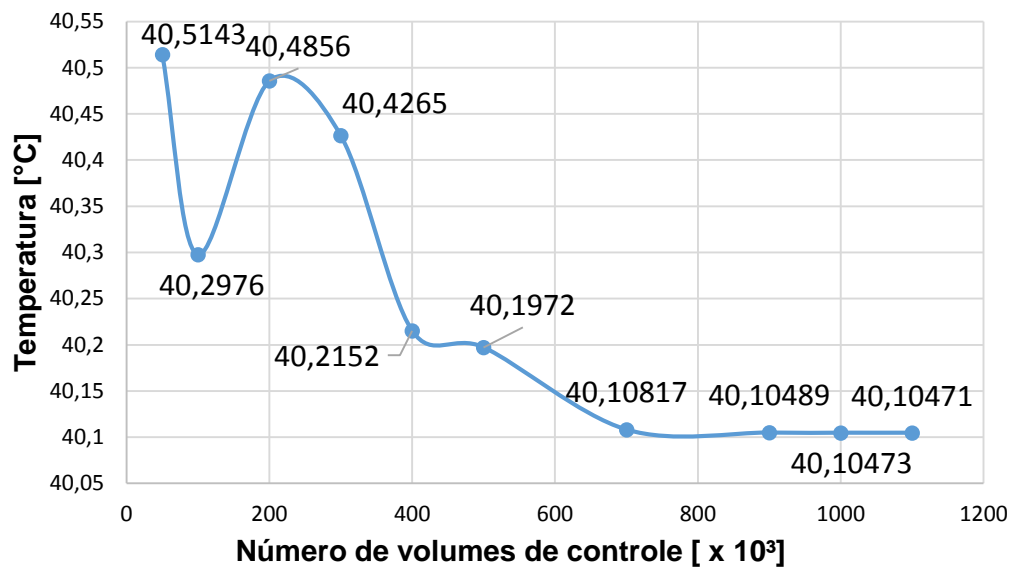


Figura 6.1 – Variação da Temperatura média do módulo em função do número de volumes.

A partir de 900.000 volumes, o valor da temperatura converge para um valor específico. Assim como proposto por Lorenzini *et al.*, 2016, o critério adotado para assumir que a variação da temperatura está em um valor aceitável é feito através da análise do erro relativo entre as sucessivas iterações. Para este trabalho, para que a convergência possa ser assumida, o erro relativo deve ser menor do que 10^{-6} , conforme a Equação 6.2.

$$E_i = \left| \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\varphi_i} \right| < 10^{-6} \quad (6.2)$$

Apesar do número de aletas e comprimento das mesmas variarem entre os casos, os mesmos critérios foram adotados para o tratamento da discretização dos volumes nas fronteiras e na transição entre os materiais, de forma que a Solução seja coerente em cada simulação. A progressão do erro relativo entre as iterações encontra-se na Tabela 6.2.

Tabela 6.2. Progressão do erro relativo com o aumento do número elementos para o caso 6.

Número de elementos [$\times 10^3$]	T_p [$^{\circ}\text{C}$]	Erro relativo
50	40,5100	5,43E-03
100	40,2900	4,72E-03
200	40,4800	1,32E-03

300	40,4265	5,23E-03
400	40,2152	6,27E-04
500	40,1900	2,04E-03
700	40,1081	8,00E-05
900	40,1049	3,99E-06
1000	40,1047	4,99E-07
1100	40,1047	-

De acordo com o critério para convergência estabelecido, 900.000 acaba sendo o número de elementos satisfatório para uma análise mais sofisticada para o problema. Todo o procedimento de simulação foi refeito, agora utilizando essa quantidade de elementos para todos os casos. Os valores da Tabela 6.1 atualizados para os novos cálculos encontram-se na Tabela 6.3.

A malha refinada apresenta variação para o valor das temperaturas inferior a 0,1%, evidenciando que a malha inicial já seria suficiente para realizar as simulações com resultados coerentes. O tempo computacional entre os dois níveis de discretização aumenta dramaticamente, fator que precisa também ser levado em conta nesse tipo de estudo.

Existe uma melhora considerável de 9,43% na potência elétrica gerada pelo módulo com a utilização das aletas no caso que apresenta o maior número de aletas, bem como o maior comprimento das mesmas. À medida que aumentamos o número e a altura das aletas, o retorno em termos de potência gerada pelo módulo precisa ser analisado, já que o comportamento não é linear. É interessante comparar também o quanto o aumento na quantidade de material impactará no aumento da transferência de calor no módulo.

Tabela 6.3. Valores das temperaturas e eficiências do módulo para as simulações refeitas com aproximadamente 900.000 volumes para cada caso

Caso	T_p [°C]	PN [%]	η_{mod}	P_{esp} [W/m²]	P_{ele} [W]	AP_{el} [%]
1	57,74	86,6	0,138	55,34	6,92	
2	48,46	90,4	0,144	57,77	7,22	4,39
3	45,87	91,4	0,146	58,45	7,31	5,62
4	43,24	92,5	0,148	59,14	7,39	6,87
5	43,09	92,6	0,148	59,18	7,40	6,94
6	40,10	93,8	0,150	59,96	7,50	8,35
7	39,34	94,1	0,150	60,16	7,52	8,71
8	42,02	93,0	0,149	59,46	7,43	7,44
9	38,83	94,3	0,151	60,30	7,54	8,96
10	37,84	94,7	0,151	60,56	7,57	9,43
	25	100	0,160	63,92	7,99	-

A Tabela 6.4 e a Figura 6.2 apresentam um comparativo entre o custo, C , aumento da potência do módulo, AP_{el} e dos custos, A_{custo} de um módulo associado a cada um

dos casos estudados até então. A *área da aleta*, A_a na Tabela 6.4 é o somatório das áreas da base das aletas e das aletas verticais.

O custo de comercialização do módulo em questão foi considerado R\$ 560,00. Além do custo do módulo, está sendo considerado também, o custo de R\$ 180,00/m² para a chapa de alumínio de 2 mm de espessura, valor atribuído às chapas em todas as simulações. Os *aumentos da potência*, e do *custo* referem-se à diferença entre utilizar ou não a aleta (comparação com o Caso 1). O *incremento da potência*, I_p e o *incremento do custo*, I_c avaliam caso a caso qual o ganho ou perda de em relação ao caso anterior.

Uma análise do comportamento da potência elétrica gerada pelo módulo e do custo do conjunto composto por módulo e aletas em função da área total de aletas considerando base e as aletas verticais pode ser melhor visualizada no gráfico da Figura 6.2.

Tabela 6.4. Aumento da potência elétrica e dos custos do módulo para todos os casos

Caso	A_a [m ²]	P_{el} [W]	C [R\$]	AP_{el} [%]	A_{custo} [%]	I_p [%]	I_c [%]
1	0	6,9175	560,00	-	-	-	-
2	0,185	7,2214	593,30	4,39%	5,95%	4,39%	5,95%
3	0,225	7,3064	600,50	5,62%	7,23%	1,18%	1,21%
4	0,265	7,3925	607,70	6,87%	8,52%	1,18%	1,20%
5	0,275	7,3974	609,50	6,94%	8,84%	0,07%	0,30%
6	0,375	7,4952	627,50	8,35%	12,05%	1,32%	2,95%
7	0,475	7,5201	645,50	8,71%	15,27%	0,33%	2,87%
8	0,365	7,4324	625,70	7,44%	11,73%	-1,17%	-3,07%
9	0,525	7,5370	654,50	8,96%	16,88%	1,41%	4,60%
10	0,685	7,5695	683,30	9,43%	22,02%	0,43%	4,40%

Com base na Figura 6.2 e na Tabela 6.4, percebe-se que para os primeiros casos, existe um aumento considerável na potência elétrica do módulo em relação ao caso sem aletas sendo o caso 5 ($N = 10$, $h = 30$ um dos mais representativos, onde um aumento de 6,94% na potência do módulo, ocasiona um aumento do custo do conjunto de 8,84%. Porém, entre o Caso 5 ($N = 10$, $h = 30$) e o Caso 6 ($N = 10$, $h = 50$) a derivada no gráfico da potência elétrica sofre uma redução considerável, e a partir deste o ponto, a curva da potência elétrica aproxima-se cada vez mais da horizontal, indicando que um maior investimento em área vai oferecer um retorno cada vez menor em termos de potência elétrica gerada pelo módulo. É necessário um estudo mais criterioso nas transições, como pode ser visto entre o Caso 7 ($N = 10$, $h = 70$) e o Caso 8 ($N = 16$, $h = 30$), onde uma redução considerável na área causa redução tanto no custo como na potência.

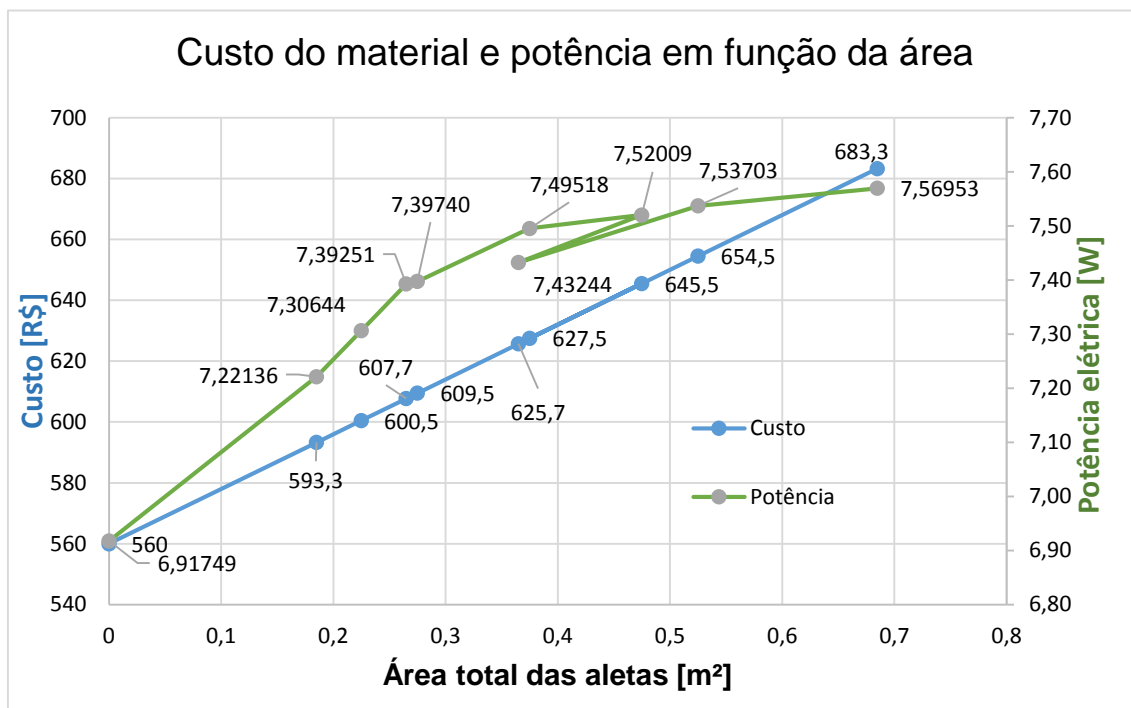


Figura 6.2 – Variação do custo e da potência elétrica em função da área de aletas empregada.

7. CONCLUSÕES

7.1 Discussão

Ao longo deste trabalho, foi evidenciado que através da utilização de superfícies estendidas, até mesmo para uma pequena área de aletas na superfície posterior de um módulo solar fotovoltaico, é possível obter uma melhora considerável na temperatura de operação do mesmo. Com a redução da temperatura de operação, ocorre um aumento na eficiência do módulo. Logo, o mesmo consegue gerar uma quantidade maior de energia elétrica. Porém, à medida que a quantidade e o tamanho das aletas aumentam, os ganhos em termos de potência elétrica gerada vão ficando cada vez menores. Dentre os parâmetros que sofreram variação nas simulações, foi possível encontrar uma região onde, mesmo a instalação de aletas de pequeno comprimento, já oferecem um retorno considerável na potência gerada pelo módulo. A medida que o número de aletas e seus comprimentos aumentam, chega a um ponto onde o investimento deixa de ser viável tanto em termos de otimização de projeto, quanto em termos de custo final, já que o custo do material que compõe a aleta representa uma quantidade significativa do valor global do produto.

7.2 Trabalhos Futuros

Amostras maiores são necessárias para definir com maior acurácia o ponto ou região onde ocorre o maior aumento de potência em função do aumento da área das

superfícies estendidas. Outras formas de avaliar o problema envolveriam, por exemplo, alterar a orientação e espessura das aletas, pois seria possível assim obter resultados melhores em termos de temperatura de operação com utilização de uma menor área das aletas. Outras variáveis como restrições no custo do projeto, definição do tamanho do vão entre as fachadas ou o tamanho máximo das aletas, por exemplo, podem auxiliar na definição de parâmetros que permitam encontrar um arranjo mais adequado, onde a temperatura do módulo é a menor possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS “**Fluent Documentation**”.

Armstrong S, Hurley WG, “**A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, Applied Thermal Engineering**” 2010

Boake, T.M., “**Understanding the General Principles of the Double Skin Façade System**”, 2003

Borkar, D.S., Prayagi, S.V., Gotmare, J. “**Performance Evaluation of Photovoltaic Solar Panel Using Thermoelectric Cooling**”, 2014

Duffie, J.A., Beckman, W.A.; “**Solar Engineering of Thermal Processes**”. Wiley, 4th Edition, 2013

Jinko Solar “**JKM310P-72 cells model product datasheet**”
https://www.jinkoSolar.com/product_detail_227.html?lan=pt acesso em 02/11/2017

Lorenzini, G., Machado, B.S., ISoldi, L.A., dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O., “**Constructal Design of Rectangular Fin Intruded Into Mixed Convective Lid-Driven Cavity Flows**” 2016

Maliska, C.R. , “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”, LTC, Rio de Janeiro. 2^a Edição, 2013

Popovici, C.G., Hudisteanu, S.V., Mateescu, T.D., Chereches, N.C., “**Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks**” Bucharest, Romania, 2015.

Sorensen, B., “**Renewable Energy**”, Academic Press - Elsevier, Oxford 4th Edition, 2011

Twidell, J.W., Weir, A.D.; “**Renewable Energy Resources**”. Taylor, 2nd Edition, 2006

Vanek, F.M., Albright, L.D., Angenent, L.T.; “**Energy Systems Engineering**”. McGrawHill, 2nd Edition 2012.

Zilles, R., Macêdo, W.N., Galhardo, M.A.B., Oliveira, S.H.F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. 1^a Ed. São Paulo. Ed. Oficina de Textos. 2012